

05

Влияние геометрии на распространение спиновых волн в системе двух волноведущих структур с линейно изменяющейся шириной

© В.А. Губанов¹, Ф.Е. Гаранин¹, А.В. Огнев², А.В. Садовников¹¹ Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия² Сахалинский государственный университет, Южно-Сахалинск, Россия
E-mail: vladmeen@gmail.com

Поступило в Редакцию 29 мая 2025 г.

В окончательной редакции 18 августа 2025 г.

Принято к публикации 29 августа 2025 г.

Проведено исследование влияния геометрии на распространение спиновых волн с использованием микромагнитного моделирования в составной структуре волноводов на основе пленки железо-иттриевого граната с линейно изменяющимися ширинами. Показано, что при увеличении расстояния между волноводами с линейно изменяющимися ширинами наблюдается уменьшение частотного диапазона с отсечением высокочастотной области. Структура может использоваться в качестве пространственного и частотного фильтра.

Ключевые слова: спиновые волны, магноника, линейное изменение ширины, многопортовая структура, система волноводов.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.01.61912.20391

Исследование физики возбуждения и передачи спиновых волн (СВ) в последнее время вызывает огромный интерес. Создание устройств на принципах магноники [1] позволит открыть альтернативный путь развития логических элементов и расширит область использованных устройств. Основным отличием от полупроводниковых устройств является перенос информации не за счет распространения электронов с сопровождаемым выделением джоулева тепла, а за счет прецессии намагниченности спина электронов, которые закреплены в кристаллической решетке материала [2–4]. В частности, используются ферро- и ферримагнитные материалы.

Одним из возможных кандидатов для создания устройств на принципах магноники являются пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ), отличительной чертой которых является крайне низкая константа затухания СВ [5–9]. Пленки ЖИГ могут быть получены различными технологическими методами, включая метод жидкофазной эпитаксии, который позволяет формировать пленки толщиной от 1 до 10 μm . Данный метод особенно привлекателен благодаря возможности получения пленок с шириной ферромагнитного резонанса ~ 0.5 Ое, измеренной на частоте 9.7 GHz.

На основе пленок ЖИГ возможно формировать структуры различной геометрии: планарные волноводы, систему волноводов на одной подложке, структуры с изменением направления групповой скорости СВ (структуры с закруглением) [10,11], периодические неоднородные по толщине структуры [12].

В работе [13] была использована структура с линейно изменяющейся шириной для коротковолнового возбуждения. Также была исследована структура с линейно

изменяющейся шириной [14], в которой в процессе распространения СВ наблюдалось увеличение групповой скорости.

Если магнонные волноводы с одинаковой шириной расположены близко друг к другу, спин-волновая связь приводит к периодическому переносу энергии между волноводами [15] за счет дипольного взаимодействия двух смежных по бокам магнитных полосок. В отличие от таких систем в настоящей работе исследуется более сложная геометрия, где ширина волноводов изменяется линейно. Новизна работы заключается в выявлении влияния градиента ширины на условия и эффективность связи между волноводами.

В настоящей работе при помощи метода микромагнитного моделирования, проводимого в программе MuMax³ [16], продемонстрированы режимы распространения СВ в структуре волноводов с линейно изменяющимися ширинами, разделенных зазором, относительно друг друга. Показано влияние параметра зазора на характеристики спин-волнового распространения, а также на режимы перераспределения спин-волновой мощности в выходные каналы.

Исследуемая структура представляет собой систему латерально связанных волноведущих волноводов — два волновода с изменяющейся шириной вдоль всей структуры (показаны на рис. 1). Данные волноводы представляют собой пленки ЖИГ толщиной $t = 10 \mu\text{m}$, которые в реальных экспериментах сформированы на подложке гадолиний-галлиевого граната методом жидкофазной эпитаксии. Данные связанные волноводы имеют следующие параметры: длина структуры $L_0 = 7000 \mu\text{m}$, ширина большей части трапеции $w_1 = 200 \mu\text{m}$, ширина

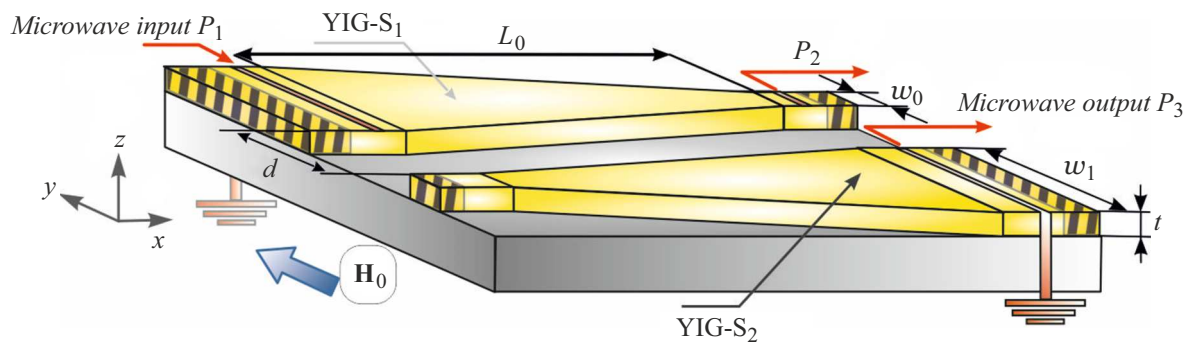


Рис. 1. Изображение исследуемой структуры: система латерально расположенных на одной подложке микроволноводов с линейно изменяющимися ширинами на основе тонкой пленки железо-иттриевого граната.

меньшей части трапеции $w_0 = 50 \mu\text{m}$, ширина зазора d изменялась от 20 до $80 \mu\text{m}$.

В микромагнитном моделировании создавались условия для возбуждения поверхностной магнитоэлектрической волны, при котором внешнее магнитное поле H_0 прилагалось вдоль оси y . Величина параметра внешнего магнитного поля H_0 составляла 1200 Ое.

В ходе решения задачи передачи спин-волнового сигнала для уменьшения отражений СВ от границ расчетной области на границах структуры (заштрихованные области на рис. 1) были введены поглощающие слои с экспоненциально возрастающим коэффициентом затухания α . Рассматриваемая система волноведущих структур обладает тремя портами. В качестве источника возбуждения спин-волнового сигнала непосредственно после области затухания располагалась микрополосковая антенна P_1 , а приемные антенны P_2 и P_3 располагались на выходе структуры, как показано на рис. 1. Антенны P_1 , P_2 и P_3 имеют ширину $30 \mu\text{m}$, при этом длина антенн P_1 и P_3 составляет $200 \mu\text{m}$, а антенны P_2 — $50 \mu\text{m}$, что соответствует ширинам волноводов.

Исследование проводилось в программном пакете MuMax³, в котором моделируемая структура разбивалась сеткой, в узлах которой численно решалось уравнение Ландау–Лифшица с затуханием Гильберта (ЛЛГ) [17,18]:

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = \gamma [\mathbf{H}_{eff} \times \mathbf{M}] + \frac{\alpha}{M_s} [\mathbf{M} \times \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t}],$$

где \mathbf{M} — вектор намагниченности, $\alpha = 10^{-5}$ — параметр затухания пленки ЖИГ, $\mathbf{H}_{eff} = \mathbf{H}_0 + \mathbf{H}_{demag} + \mathbf{H}_{ex} + \mathbf{H}_a$ — эффективное магнитное поле, \mathbf{H}_0 — внешнее магнитное поле, \mathbf{H}_{demag} — поле размагничивания, \mathbf{H}_{ex} — обменное поле, \mathbf{H}_a — поле анизотропии, $\gamma = 2.8 \text{ MHz/Oe}$ — гиромагнитное отношение.

Взаимодействие между волноводами в уравнении ЛЛГ учитывается через расчет \mathbf{H}_{eff} для всей системы, которое включает все взаимодействия. MuMax³ напрямую решает уравнение ЛЛГ численно на дискретной сетке, учитывая все взаимодействия (обменное, дипольное, зеемановское и т. д.) без предварительных приближений

по силе связи. Если волноводы находятся далеко друг от друга, симулятор покажет слабую связь. Если они близко, то проявится сильная связь.

Первоначально была рассмотрена статическая задача с построением распределения внутренних магнитных полей H_{int} , показанных на рис. 2. На рис. 2, *a* приведена карта распределения внутреннего магнитного поля H_{int} в двух волноводах с плавно изменяющимися ширинами при зазоре $d = 40 \mu\text{m}$. Необходимо отметить, что при уменьшении ширины волноведущего канала происходит уменьшение значения H_{int} . И при расположении латерально друг к другу волноводов с линейно изменяющимися ширинами при фиксированном значении x -координаты значение внутреннего магнитного поля H_{int} в каждом из волноводов будет разным. На рис. 2, *b* показаны профили H_{int} , снятые вдоль x -координаты и захватывающие сразу два волновода с плавно изменяющимися ширинами. Можно сказать, что единственная область, в которой величины H_{int} для обоих волноводов равны, соответствует $x = 3.5 \text{ mm}$ (отмечена серой штриховой линией и обозначена как $H_{int,m}$). И при смещении области среза дальше по оси x разница между величинами внутреннего магнитного поля обоих волноводов ΔH_{int} может составлять $\sim 150 \text{ Oe}$. Передача спиновой волны из одного волновода в другой происходит в области, где их ширины примерно одинаковы, что согласуется с теорией связанных мод [19]. Согласно этой теории, при изменении величины внутреннего магнитного поля H_{int} изменяются условия распространения СВ, что приводит к смещению дисперсионной кривой и изменению частотного диапазона их существования.

Далее рассмотрена конфигурация волноводов с линейно изменяющимися ширинами, в которых расстояние между волноводами d будет изменяться. На рис. 3 представлены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ), полученные на выходных портах P_2 (*a*) и P_3 (*b*) для случаев разных зазоров между волноводами. Черными линиями обозначены амплитудно-частотные характеристики, полученные для одиночного волновода с плавно изменяющейся шириной: в области с шириной волновода

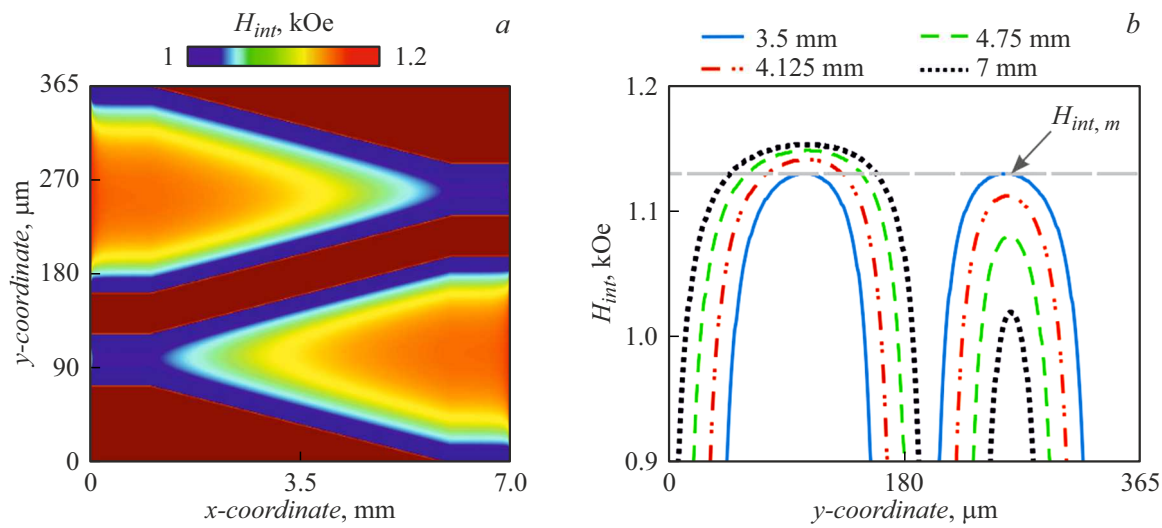


Рис. 2. *a* — карта распределения внутреннего магнитного поля H_{int} в латерально связанной структуре с линейно изменяющимися ширинами при зазоре $d = 40 \mu\text{m}$. *b* — распределение H_{int} , снятое при фиксированном значении x -координаты: $x = 3.5 \text{ mm}$ (сплошная линия), 4.125 mm (штрихпунктирная линия), 4.75 mm (штриховая линия) и 7 mm (пунктирная линия).

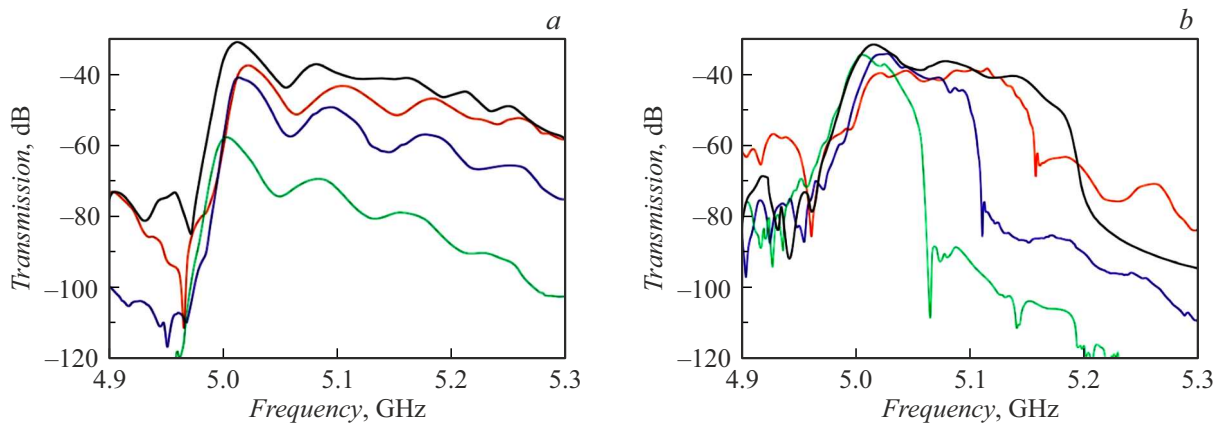


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики, полученные для выходных портов P_2 (*a*) и порта P_3 (*b*). Цветом на рисунке выделены амплитудно-частотные характеристики для случаев зазора между волноводами с линейно изменяющейся шириной $d = 20 \mu\text{m}$ (красная линия), $40 \mu\text{m}$ (синяя линия), $80 \mu\text{m}$ (зеленая линия). Черным цветом обозначены АЧХ, полученные для одиночного волновода с плавно изменяющейся шириной: в области с шириной волновода 50 (*a*) и $200 \mu\text{m}$ (*b*). Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи.

$50 \mu\text{m}$ (рис. 3, *a*) и $200 \mu\text{m}$ (рис. 3, *b*). По полученным АЧХ для выходного порта P_3 можно отметить, что при увеличении зазора между волноводами с линейно изменяющейся шириной наблюдается сужение частотного диапазона с отсечением высокочастотной области. Необходимо отметить, что чем больше значение параметра d , тем сильнее происходит смещение в низкочастотную область. В случаях $d = 20$ и $80 \mu\text{m}$ разница между частотами отсечки составляет $\sim 100 \text{ MHz}$. Также необходимо отметить, что для случая выходного порта P_2 при увеличении зазора d средний уровень передачи на АЧХ уменьшается.

Для наблюдаемых на АЧХ провалов были построены пространственные карты распределения интенсивности

СВ для рассмотренных случаев разных значений параметра d (рис. 4). На частоте $f = 5.068 \text{ GHz}$ (рис. 4, *a*) при параметре $d = 20 \mu\text{m}$ наблюдается режим, при котором спиновая волна перекачивается в нижний планарный волновод. При увеличении параметра d до $40 \mu\text{m}$ на частоте $f = 5.062 \text{ GHz}$ (рис. 4, *b*) также наблюдается режим, при котором спиновая волна перекачивается в нижний планарный волновод, но с меньшей мощностью. При увеличении параметра d до $80 \mu\text{m}$ на частоте $f = 5.050 \text{ GHz}$ (рис. 4, *c*) почти не наблюдается режим, при котором СВ перекачивается в нижний планарный волновод. При дальнейшем увеличении d ($> 100 \mu\text{m}$) волноводы становятся изолированными, и их взаимное влияние исчезает.

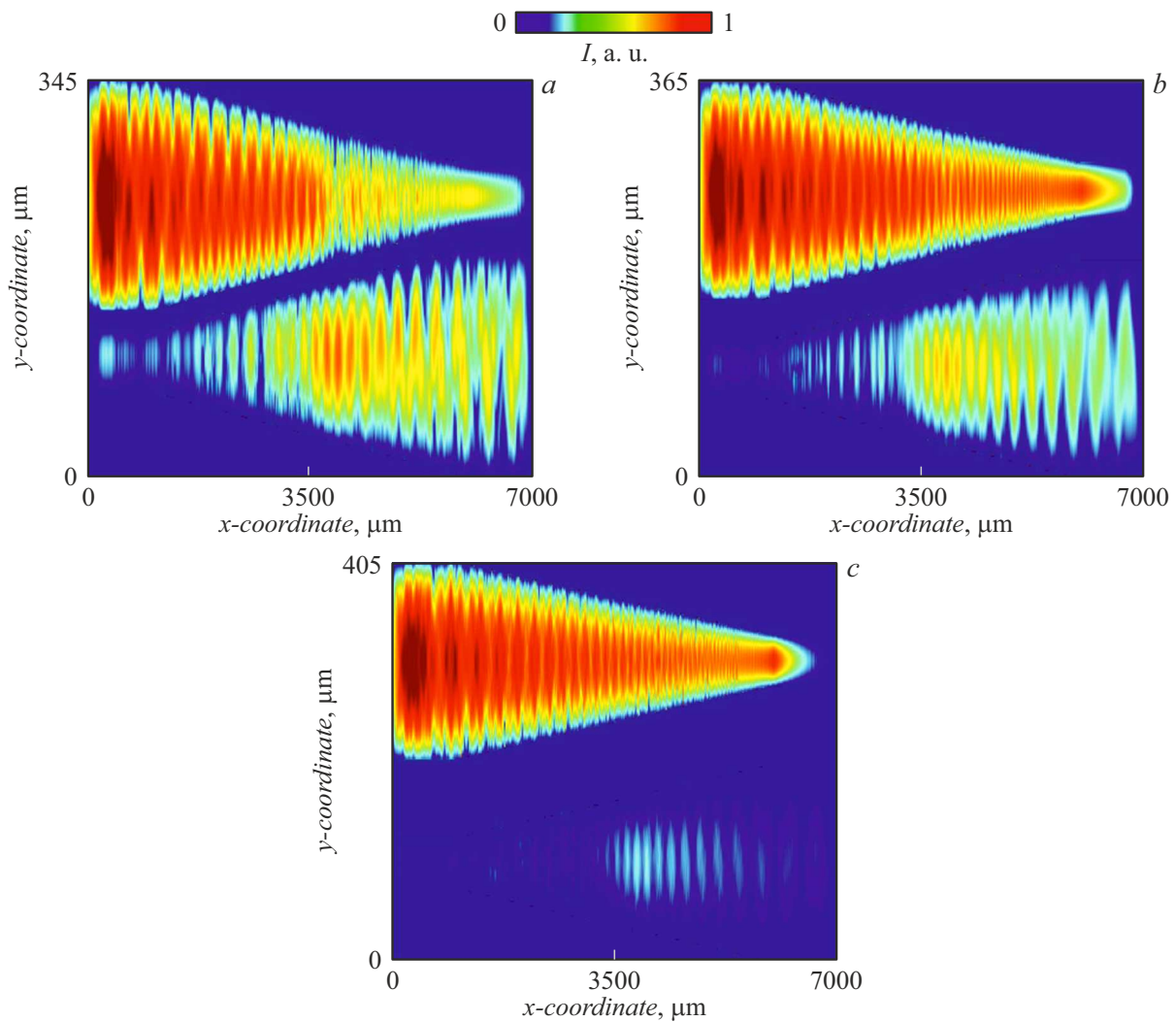


Рис. 4. Пространственные карты распределения интенсивности СВ в системе латерально расположенных на одной подложке микроволноводов на частоте $f_1 = 5.068$ GHz при $d = 20 \mu\text{m}$ (a), на частоте $f_2 = 5.062$ GHz при $d = 40 \mu\text{m}$ (b) и на частоте $f_3 = 5.050$ GHz при $d = 80 \mu\text{m}$ (c).

Во всех трех случаях на картах распределения интенсивности спиновой волны переизлучение спин-волновой мощности наблюдается при $x \sim 3.5$ mm, что можно связать с тем, что в этой области происходит выравнивание величины внутренних магнитных полей H_{int} . И при этом при увеличении параметра d интенсивность переброшенной спиновой волны в смежный волновод уменьшается.

Таким образом, с помощью численного моделирования была исследована система латерально связанных волноводов с линейно изменяющимися ширинами. Были построены амплитудно-частотные характеристики и пространственные карты распределения интенсивности СВ, демонстрирующие режимы перераспределения мощности СВ. При увеличении зазора d между микроволноводами эффективность переноса СВ уменьшается. Данная структура может быть использована как направленный ответитель и частотный фильтр СВЧ-сигнала за счет

эффективного переизлучения сигнала при $x \sim 3.5$ mm и фильтрации сигнала с отсечением высокочастотной области для создания устройств обработки информационных сигналов на принципах магноники.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (№ FZNS-2023-0012).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] С.А. Никитов, Д.В. Калябин, И.В. Лисенков, А.Н. Славин, Ю.Н. Барабаненков, С.А. Осокин, А.В. Садовников, Е.Н. Бегинин, М.А. Морозова, Ю.П. Шараевский, Ю.А. Филимонов, Ю.В. Хивинцев, С.Л. Высоккий, В.К. Сахаров, Е.С. Павлов, УФН, **185** (10), 1099 (2015). DOI: 10.3367/UFN.0185.201510m.1099 [S.A. Nikitov, D.V. Kalyabin, I.V. Lisenkov, A.N. Slavin, Yu.N. Barabanenkov, S.A. Osokin, A.V. Sadovnikov, E.N. Beginin, M.A. Morozova, Yu.P. Sharaevsky, Yu.A. Filimonov, Yu.V. Khivintsev, S.L. Vysotsky, V.K. Sakharov, E.S. Pavlov, Phys. Usp., **58** (10), 1002 (2015). DOI: 10.3367/UFN.0185.201510m.1099].
- [2] P. Schuddinck, F.M. Bufler, Y. Xiang, A. Farokhnejad, G. Mirabelli, A. Vandooren, B. Chehab, A. Gupta, C. Roda Neve, G. Hellings, J. Ryckaert, in *IEEE Symp. on VLSI Technology and Circuits (VLSI Technology and Circuits)* (IEEE, 2022), p. 365. DOI: 10.1109/VLSITechnologyandCir46769.2022.9830492
- [3] A. Vandooren, N. Parihar, J. Franco, R. Loo, H. Arimura, R. Rodriguez, F. Sebaai, S. Iacovo, K. Vandersmissen, W. Li, G. Mannaert, D. Radisic, E. Rosseel, A.Y. Hikavyu, A. Jourdain, O. Mourey, G. Gaudin, S. Reboh, L.L. Van-Jodin, G. Besnard, C.R. Neve, B. Nguyen, I.P. Radu, E.D. Litta, N. Horiguchi, in *IEEE Symp. on VLSI Technology and Circuits (VLSI Technology and Circuits)* (IEEE, 2022), p. 330. DOI: 10.1109/VLSITechnologyandCir46769.2022.9830400
- [4] G. Mirabelli, A. Vandooren, C. Roda Neve, V.V. Gonzalez, H. Mertens, A. Farokhnejad, P. Schuddinck, G. Murdoch, S.M. Salahuddin, O. Zografos, L. Ragnarsson, P. Weckx, Z. Tokei, G. Hellings, J. Ryckaert, Proc. SPIE, **12495**, 124951K (2023). DOI: 10.1117/12.2656456
- [5] V. Demidov, S. Urazhdin, G. de Loubens, O. Klein, V. Cros, A. Anane, S. Demokritov, Phys. Rep., **673**, 1 (2017). DOI: 10.1016/j.physrep.2017.01.001
- [6] V. Cherepanov, I. Kolokolov, V. Lvov, Phys. Rep., **229** (3), 81 (1993). DOI: 10.1016/0370-1573(93)90107-O
- [7] S.L. Vysotsky, Yu.V. Khivintsev, V.K. Sakharov, G. Dudko, A. Kozhevnikov, S.A. Nikitov, N.N. Novitskii, A.I. Stognij, Yu.A. Filimonov, IEEE Magn. Lett., **8**, 3706104 (2017). DOI: 10.1109/LMAG.2017.2701787
- [8] S. Sharko, A. Serokurova, N. Novitskii, V. Ketsko, A. Stognij, Ceramics, **6**, 1415 (2023). DOI: 10.3390/ceramics6030087
- [9] C. Hauser, T. Richter, N. Homonnay, C. Eisenschmidt, M. Qaid, H. Deniz, D. Hesse, M. Sawicki, S.G. Ebbinghaus, G. Schmidt, Sci. Rep., **6**, 20827 (2016). DOI: 10.1038/srep20827
- [10] A.V. Sadovnikov, C.S. Davies, V.V. Kruglyak, D.V. Romanenko, S.V. Grishin, E.N. Beginin, Y.P. Sharaevskii, S.A. Nikitov, Phys. Rev. B, **96**, 060401 (2017). DOI: 10.1103/PhysRevB.96.060401
- [11] A.A. Martyshkin, C.S. Davies, A.V. Sadovnikov, Phys. Rev. Appl., **18**, 064093 (2022). DOI: 10.1103/PhysRevApplied.18.064093
- [12] A.V. Sadovnikov, V.A. Gubanov, S.E. Sheshukova, Y.P. Sharaevskii, S.A. Nikitov, Phys. Rev. Appl., **9**, 051002 (2018). DOI: 10.1103/PhysRevApplied.9.051002
- [13] V.E. Demidov, M.P. Kostylev, K. Rott, J. Münchenberger, G. Reiss, S.O. Demokritov, Appl. Phys. Lett., **99**, 082507 (2011). DOI: 10.1063/1.3631756
- [14] D.V. Kalyabin, A.V. Sadovnikov, E.N. Beginin, S.A. Nikitov, J. Appl. Phys., **126**, 17 (2019). DOI: 10.1063/1.5099358
- [15] A. Annenkov, S.V. Gerus, J. Commun. Technol. Electron., **41**, 196 (1996).
- [16] A. Vansteenkiste, J. Leliaert, M. Dvornik, M. Helsen, F. Garcia-Sanchez, B.V. Waeyenberge, AIP Adv., **4**, 107133 (2014). DOI: 10.1063/1.4899186
- [17] L. Landau, E. Lifshitz, Phys. Z. Sow., **8**, 153 (1935). DOI: 10.1016/b978-0-08-010586-4.50023-7
- [18] T.L. Gilbert, J.M. Kelly, in *Conf. Magnetism and Magnetic Materials* (American Institute of Electrical Engineers, N.Y., 1955), p. 253–263.
- [19] М.А. Морозова, Н.Д. Лобанов, О.В. Матвеев, С.А. Никитов, Письма в ЖЭТФ, **115** (12), 793 (2022). DOI: 10.31857/S1234567822120072 [M.A. Morozova, N.D. Lobanov, O.V. Matveev, S.A. Nikitov, JETP Lett., **115** (12), 742 (2022). DOI: 10.1134/S0021364022600963].